

任宗海, 余建奎, 王庆, 等. 1958 年以来莱州湾南部海岸线及水下地形演变[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(11): 1-12.

REN Zonghai, YU Jiankui, WANG Qing, et al. On the change of coastline and underwater terrain of the southern Laizhou Bay since 1958[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(11): 1-12.

# 1958 年以来莱州湾南部海岸线及水下地形演变

任宗海<sup>1,2</sup>, 余建奎<sup>1,3</sup>, 王庆<sup>1</sup>, 战超<sup>1\*</sup>, 耿文倩<sup>1</sup>, 曹印<sup>1</sup>, 李瑞<sup>1</sup>, 钱张帆<sup>1</sup>

(1 鲁东大学海岸研究所, 烟台 264025; 2 南京师范大学海洋科学与工程学院, 南京 210023;

3 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002)

**摘要:** 莱州湾南部自 20 世纪 80 年代以来海岸地貌发生了显著变化, 研究海岸地貌的演变规律对海岸防护和海岸带资源可持续利用具有重要意义。本文以不同时期测量或成像的海图和遥感影像为数据源, 基于 RS 和 GIS 技术对海岸线和水下岸坡演变进行定量研究。结果表明: ①1958–2021 年自然岸线逐渐减少, 人工岸线逐渐增加, 到 2021 年人工岸线长度约占总长度的 87%, 海岸线演化与海岸带建设密切相关; ②以 1984 年为界, 1984 年前以自然演变为主, 1984 年后人类活动起主导作用, 自然演变下海岸线以向陆蚀退为主, 人为干预下以向海推进为主; ③水下岸坡冲淤分布极不平衡, 总体呈侵蚀–淤积–淤积减缓的趋势。南部河流入海口处在 1984 年后基本呈侵蚀状态。0 m 和 2 m 等深线有前进有后退, 但变化幅度相对较小; 5~9 m 等深线在堤河以西海域向海前进显著, 其冲淤演变复杂; 10 m 等深线以堤河为界表现出西淤东蚀的状态。河流来沙是导致海岸线和水下岸坡演变的重要物质基础, 波浪和潮流是主要的驱动力。人工设施在引起河流输沙减少的同时, 也导致海岸线大幅向海推进、入海河口受到侵蚀。东北部莱州浅滩附近受人为影响处于侵蚀、解体状态, 未来将会继续受到侵蚀。

**关键词:** 莱州湾; 海岸线; 水下岸坡; 等深线

中图分类号: P736.2; P737.1

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.207

## 0 引言

海岸带是全球产业集聚、人口集中和经济发展水平较高的区域, 其地貌演化过程与人类社会的发展密切相关<sup>[1-2]</sup>。在全球海平面上升的大背景下, 受高强度人类活动的影响, 全球范围内的海岸演变呈加快趋势, 海岸地貌演化受到广泛关注<sup>[3]</sup>。改革开放以来, 中国沿海地区经济建设快速发展, 受工业

化和城市化建设的影响, 海岸带地区人为用地面积不断增加。莱州湾南部三面环陆, 近海地形平坦开阔, 入海河流众多, 经济发展条件优越, 是中国沿海地区受人工建设影响的典型岸段。自 20 世纪 80 年代以来, 莱州湾南部海岸人类活动的影响逐渐加剧, 开发强度不断加大, 海岸地貌的侵蚀和淤积态势变化显著。受水库、近海养殖、盐田以及港口和围填海等工程建设的影响, 全部自然岸段几乎被人工设施所占用。2009 年后随着山东半岛蓝色经济区和黄河三角洲高效生态经济区建设政策的实施, 莱州湾沿岸开发强度和产业规模继续扩大。大规模的人类活动导致海岸线持续向海推进, 最终深刻改变了海岸地貌的自然发展趋势, 同时也对莱州湾南部地区的生态与环境造成巨大压力。

海岸地貌演变是一定阶段内地貌与沉积环境变化的体现, 而海岸线的变迁和 underwater 岸坡的冲淤变化是海岸地貌演变的重要组成部分<sup>[4-6]</sup>。许多学者

收稿日期: 2022-07-19

资助项目: 国家自然科学基金(41901006); NSFC-山东联合基金(U1706220); 山东高校青创科技团队(2020KJH002); 山东省自然科学基金(ZR2019BD005)

作者简介: 任宗海(1998—), 男, 在读博士, 主要从事海岸带环境及地貌演变方面的研究工作。E-mail: renzonghai0807@163.com

\* 通讯作者: 战超(1986—), 女, 博士, 教授, 主要从事河口海岸地貌与环境演变方面的研究工作。E-mail: zhanchao0226@163.com

对莱州湾地区海岸地貌变化进行研究,并取得了重要的成果。尹砚军等<sup>[7]</sup>和刘世昊等<sup>[8]</sup>通过对莱州湾东岸三山岛附近岸段表层沉积物、海岸线和冲淤变化研究,发现波浪和人类活动是导致该地区冲淤演变的重要因素;仲少云等<sup>[9]</sup>和李雪艳等<sup>[10]</sup>通过对莱州湾东部界河口—刁龙嘴典型砂质岸段的土地利用变化研究,发现潮上带大面积的土地利用是导致海岸地貌冲淤演变和侵蚀的重要因素;战超等<sup>[4]</sup>对莱州湾东部砂质海岸线、水下岸坡冲淤和等深线变化进行分析,发现东岸在人类活动的影响下发生了5次冲淤交替;孙伟富<sup>[11]</sup>和彭远新等<sup>[12]</sup>分别对1978—2009、1973—2017年莱州湾地区的海岸线变化进行监测;丁晓松等<sup>[13]</sup>基于DSAS系统对黄河三角洲和莱州湾海岸线变化速率进行研究,发现岸线变化显著的岸段为人为影响地区;崔钰磊等<sup>[14]</sup>通过对1979—2014年莱州湾东南岸的海岸线及地貌类型变化分析,发现人类活动在该地区地貌演变中起着重要作用。前人对莱州湾地区的海岸演变研究主要集中在海岸线变化、沉积物变化、土地利用变化等方面,关于海岸地貌的演变大都为分析岸线或等深线(2、5、10 m)之间的变化,对水下冲淤变化关注较少,且部分研究时间距今较久。

近几十年来,莱州湾南部开发活动强度不断增大,地貌变化更加显著,因此,有必要对莱州湾南部数十年尺度上的海岸线、水下冲淤分布及等深线(0~10 m)变化进行系统研究,分析并对比其变化和演变原因。同时,本研究基本反映了莱州湾南部自20世纪80年代以来经济建设及人类活动影响下的海岸演变,丰富和更新了莱州湾地区海岸地貌的研究。本文以不同时期的海图和遥感影像为数据源,通过利用RS、GIS技术探究1958年以来莱州湾南部海岸线变迁与水下地形演变,综合海岸带陆上与水下冲淤变化来定量分析海岸地貌的演变及原因机理,从而为科学预测海岸地貌演变的趋势和海岸带经济的可持续发展提供理论依据。

## 1 研究区概况

莱州湾位于山东半岛西北部、渤海南部,和辽东湾、渤海湾并称为渤海三大海湾。湾口西起黄河入海口(37°39'N、119°16'E),东到砣矶岛高角(37°41'10"N、120°13'10"E),海岸线长约319.06 km,面积达6 966 km<sup>2</sup><sup>[15]</sup>。莱州湾是黄河三角洲与胶东半岛之间典型的弱潮海湾<sup>[16]</sup>。莱州湾地区属于温

带大陆性气候,受温带及热带气旋和寒潮的影响,风暴潮频发,风力作用强烈<sup>[17]</sup>。莱州湾地区的波浪以风浪为主,常浪及强浪向均为NNE向,次常强浪向均为SW向,最大波高4.5 m<sup>[9-10]</sup>。该地区潮流主要为不规则半日潮,平均潮差仅约1.0 m。其西侧为正规半日潮,最大潮流为100~150 cm/s;东侧为不正规半日潮,最大潮流为50~100 cm/s<sup>[18-19]</sup>。在常浪向和强浪向均为偏NE向的海洋动力条件下,莱州湾东部的泥沙在波浪的作用下往SW向运输,指向湾顶即莱州湾南部。同时,由于黄河口口外海流较大,又属往复流性质,黄河三角洲入海泥沙是随海流向河口两侧运动。在波浪和潮流的作用下,莱州湾西侧的泥沙也向南输运。莱州湾为典型的复式海岸,其虎头崖以东为砂质海岸,以西为淤泥质海岸。南部沿湾自西向东发育的河流主要有淄脉河、小清河、弥河、白浪河、丰产河(虞河)、堤河、潍河和胶莱河等(图1)。这些河流携带的人海泥沙成为莱州湾沉积物的重要来源。近年来,随着上游水库等水利工程的修建,河流入海输沙量逐渐减少<sup>[20-21]</sup>。20世纪80年代中期以来,莱州湾南部地区人类开发活动逐渐增强,主要包括养殖池、盐田、港口及围填海等海岸工程的建设,导致原本宽缓的潮滩被大面积占用,海岸线向海推进,大量自然岸线被人工岸线所取代,海岸地貌变化明显。本文所研究的莱州湾南部系指淄脉河与虎头崖之间典型的淤泥质海岸和永丰河以东、虎头崖以北的0~10 m等深线之间的水下岸坡海域。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据源

本文中的数据来源主要包括1958—2021年不同时期的海图、卫星遥感影像和野外实测数据资料,时间总跨度63年。遥感影像主要来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>)和美国地质调查局(<http://glovis.usgs.gov/>)。为减小海岸线提取的误差,遥感影像尽可能选取低潮、云量少且没有大风、风暴潮等自然灾害发生时的影像。受卫星传感器运行时间的客观限制,缺少1958年的遥感影像数据。因此,1958年的海岸线采用该年份海图中实测的潮滩上界陆地边线即大潮高潮线,而1984、2002、2015和2021年海岸线采用卫星遥感影像数据(表1)。



图 1 莱州湾南部地理位置

Fig.1 The position of southern coast of Laizhou Bay

由于所获取的海图资料有限, 缺少 2015 年后的海图数据, 本文中所用的海图为中国人民解放军海军司令部实测绘制的 1958—2015 年莱州湾及附近海域海图(表 2)。综上, 文中分析海岸线的年份为 1958—2021 年, 分析水下地形冲淤变化的年份为 1958—2015 年。

表 1 遥感影像资料信息  
Table 1 Remote sensing image data

序号	卫星/传感器	分辨率/m	成像日期	波段数
1	Landsat5/TM	30	1984-07-17	7
2	Landsat5/TM	30	2002-11-24	7
3	Landsat8/OLI	15	2015-06-21	11
4	Landsat8/OLI	15	2021-11-12	11

表 2 不同时期莱州湾及附近海域海图信息  
Table 2 Sea charts of Laizhou Bay and nearby areas in different periods

序号	区域	测量年份	比例尺	测量基准面
1	老黄河口—龙口港	1958	1:150 000	理论最低潮面
2	歧河口—龙口港	1984	1:250 000	理论最低潮面
3	莱州湾	2002	1:150 000	理论最低潮面
4	莱州湾	2015	1:150 000	理论最低潮面

## 2.2 海岸线提取

海岸线的提取主要有计算机自动提取和人工目视解译 2 种方法<sup>[22]</sup>。海陆边界的提取主要有平均高潮线法、平均低潮线法和瞬时水边线法等<sup>[23-25]</sup>。瞬时水边线通常为卫星过境时所拍到的遥感影像中的陆地与海洋的分界线, 而平均低潮线为多年平均低潮位下的海岸线, 两者均受潮位的影响较大。受卫星过境周期和拍摄时间的限制, 提取出的瞬时水边线和平均低潮线需根据具体的潮位数据进行修正, 过程相对繁琐且对数据的精度要求较高。平均大潮高潮线为多年平均大潮高潮发生时所达到的陆地最上界, 通常可以通过非监督分类和目视解译的方法来提取, 过程相对简单且提取出的海岸线精度较好<sup>[26]</sup>。平均大潮高潮线受潮汐的影响较小, 提取出的海岸线不需要再进行潮位校正, 被广泛用于海岸线变化研究。莱州湾南部地区潮滩面积较广, 而潮滩通常位于大潮高潮线以下部分, 利用平均大潮高潮线可更好地分析海岸的蚀淤变化。本研究时间跨度较长, 缺少历史年份详细的潮位数据, 因此, 本文中采用目视解译的方法提取不

同时期的平均大潮高潮线,将平均大潮高潮线作为海岸线变化研究的岸线。

海岸线提取时首先利用 ENVI 5.3 软件对遥感影像进行预处理,将影像进行辐射定标、FLASSH 大气校正和几何精校正,经校正后的影像误差控制在 0.5 个像元内。将预处理后得到的图像导入到 ArcMap 10.2。将遥感影像、海岸线、ArcMap 中数据框的坐标统一采用为 WGS-84 空间坐标系、UTM Zone 50N 地图投影。因研究区岸段多为淤泥质海岸,其潮上带、潮间带和潮下带在遥感影像中表现明显。在目视解译提取平均大潮高潮线时,自然状态下的岸线选择潮上带的下界即海岸植物生长的下限、淤泥质滩涂或无潮沟、明显潮水区的上界;在有人工岸线的地方,选取其向海一侧的外沿,在提取时将明显突出海岸伸向海中的人工建筑物裁掉,使之与两侧岸线相平。Landsat 影像中部分区域的地物放大后并不十分清楚,因此,又利用海图中的对应年份实测的海陆分界线和 Google Earth 高分辨率影像进行对比,将不确定的地方加以明确和修正。个别海图中部分地区的实测陆地边界线与实测水深数据年份不一致,所以全靠海图校正并不准确;而 Google Earth 影像虽分辨率高,但影像时间年份不完整且不易于矢量操作。因此,结合两者对目视解译提取出的岸线进行修正,再将目视解译修正后的岸线进行适当的平滑处理。

### 2.3 海图数字化与 DEM 构建

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是研究水下岸坡冲淤变化的一种重要手段,其等深线变化可定量分析水下岸坡的冲淤变化规律。本文中所用的海图主要为 1958、1984、2002 和 2015 年 4 期莱州湾及附近海域海图。海图中的测量基准面一致,不需要再进行统一处理。将 4 幅海图及所有提取出的数据统一使用 WGS84 坐标、UTMZone50 投影坐标系。水下岸坡区域主要为永丰河以东、虎头崖以北的 0~10 m 等深线之间的海域。

具体步骤如下:①将莱州湾 1958、1984、2002 和 2015 年 4 期海图在 ArcGIS 10.2 中进行地理配准,并将研究区从海图上裁出。②建立个人地理数据库,提取研究区内不同时期海图上的岸线和水深数据。③将研究区内 4 期海图中提取出的水深点数据进行克里金插值,采用球面半变异函数结构模型使水深数据扩散到整个研究区,生成不同时期水下岸坡数字高程模型。尽可能保证每幅海图中所

用的水深点范围、位置相同。本文中所提取出的水深点数量较多,分布相对密集,从而有利于提高预测精度。④将生成的不同时期水下岸坡 DEM 进行空间叠加,分析水下岸坡的冲淤演变。⑤通过 3D 空间分析插值得到不同时期该海域 0~10 m 等深线,并重点分析水下岸坡 0、2、5、10 m 等深线的变化。利用 Arcmap 进行水深插值计算时存在一定的精度误差。依据前人研究可知重合点数越多,分布越均匀,插值精度越好<sup>[27-28]</sup>。本文通过选取水深重合点的方法进行精度验证,每幅海图中选取 40~50 个点,其残差平均误差均<0.3 m,研究结果可信度较高。

## 3 结果

### 3.1 海岸线长度变化

1958—2021 年,莱州湾南部海岸线的长度变化明显,其自然岸线长度逐渐减少,人工岸线长度逐渐增加(图 2)。莱州湾南部为典型的人工建设岸段,海岸线由原本的自然侵蚀向人为向海推进转变。为更好地把握不同时期海岸线的变化规律,本文根据提取出的 5 个时期海岸线的变化特征,又将莱州湾南部自东向西划分为虎头崖—胶莱河、胶莱河—堤河、堤河—弥河和弥河—淄脉河岸段。

1958—2021 年,莱州湾南部海岸线的总长度和人工岸线长度都有所增加,但人工岸线的增幅更明显。1984 年前海岸线变化幅度相对较小,1984 年后海岸线的变化加速。与 1984 年相比,2021 年海岸线长度由 104.64 km 增加到 143.62 km,年均增加 0.62 km。就自然岸线而言,1958—2021 年自然岸线长度由 104.64 km 减少至 10.08 km,年均减少 1.50 km。其中,1984—2002 和 2002—2015 年自然岸线长度减少最多,分别为 32.30 和 49.92 km。2015 年之后自然岸线基本消失,到 2021 年,自然岸线长度仅减少了 2.55 km。就人工岸线而言,2021 年人工岸线的长度增加至 133.54 km,约占 2021 年海岸线长度的 87%。由于自然岸线向人工岸线转变,导致 1984—2002 和 2002—2015 年人工岸线长度增加最多,分别为 36.24 和 64.82 km。2015—2021 年,海岸线基本被人为固定,围垦受限导致海岸线仅在虎头崖—潍河岸段向海局部推进。该岸段由于围海养殖建设导致人工岸线增加 15.18 km。

1984 年之后,莱州湾南部的自然岸段仅在堤河

和潍河之间略有分布。1984—2002 年, 莱州湾南部在弥河—白浪河、潍河—胶莱河之间以及潍河口西侧进行了大规模盐田建设。2010 年, 由于潍坊港和附近围填海工程的建设导致人工海岸线大幅向海推进(图 3)。到 2021 年, 人工设施的大面积修建导致莱州湾南部的自然岸线基本消失。淄脉河—弥河口西侧被养殖池所替代; 弥河—堤河口被港口、防潮堤和围填海替代; 堤河—潍河口存在少部分人工海岸, 其他岸段被养殖池替代; 潍河—胶莱河口两侧被盐田替代; 胶莱河—虎头崖岸段被防潮堤和养殖池替代。在海岸工程中, 养殖池和盐田占用最多, 其次为港口及围填海修建, 另有部分为防波堤建设。

### 3.2 海岸线时空演变

受自然和人为因素的双重影响, 1958—2021 年莱州湾南部海岸线具有明显的区域性和阶段性变

化(图 4)。本文通过不同时期海岸冲淤面积变化对不同时期海岸线演变进行分析。20 世纪 80 年代后, 随着海岸带建设及社会经济的发展, 人类活动的影响逐渐加强。总体来看, 在自然演变的影响下(1958—1984 年), 海岸线以向陆蚀退为主, 人为干预影响(1984—2021 年)以向海推进为主。以堤河为界, 堤河以东处于蚀退过程, 堤河以西处于推进过程。

1958—2021 年, 海岸线向陆蚀退面积 58.20 km<sup>2</sup>, 向海推进面积为 169.47 km<sup>2</sup>。其中, 海岸线向海推进最显著的为堤河—弥河岸段, 推进面积为 83.05 km<sup>2</sup>; 海岸线向陆蚀退最显著的为胶莱河—堤河岸段, 蚀退面积为 49.37 km<sup>2</sup>。1958—1984 年, 在自然因素主导下, 4 个岸段均处于不同程度的蚀退过程。蚀退面积最多的为胶莱河—堤河岸段, 为 38.15 km<sup>2</sup>; 其次为堤河—弥河和虎头崖—胶莱河岸段, 蚀退面积分别为 23.59 和 21.67 km<sup>2</sup>。弥河—淄脉河岸段以向

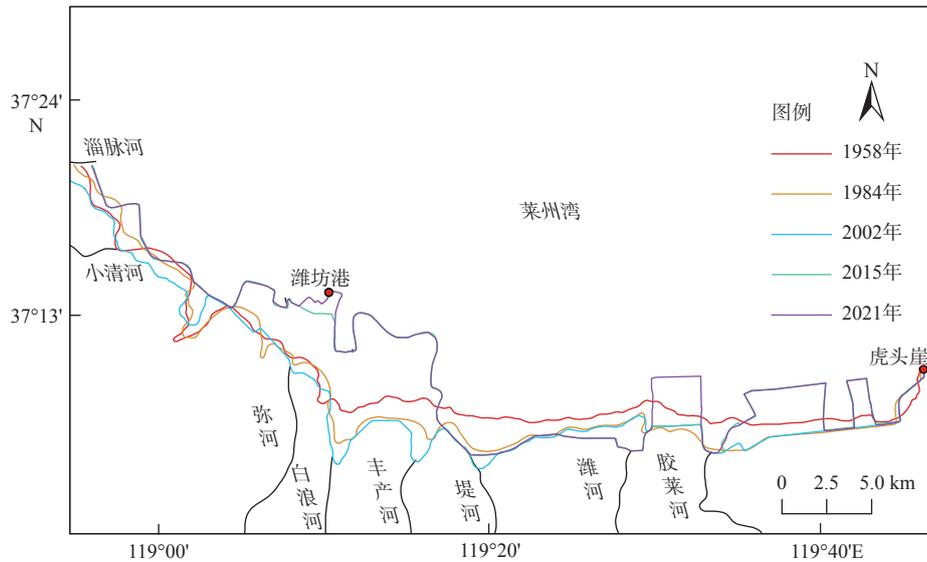


图 2 1958—2021 年不同时期海岸线  
Fig.2 Coastlines in different periods from 1958 to 2021

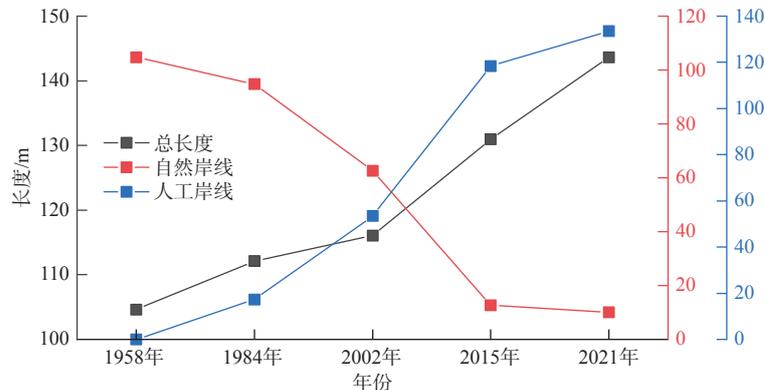


图 3 1958—2021 年海岸线长度变化  
Fig.3 Changes in coastline length from 1958 to 2021

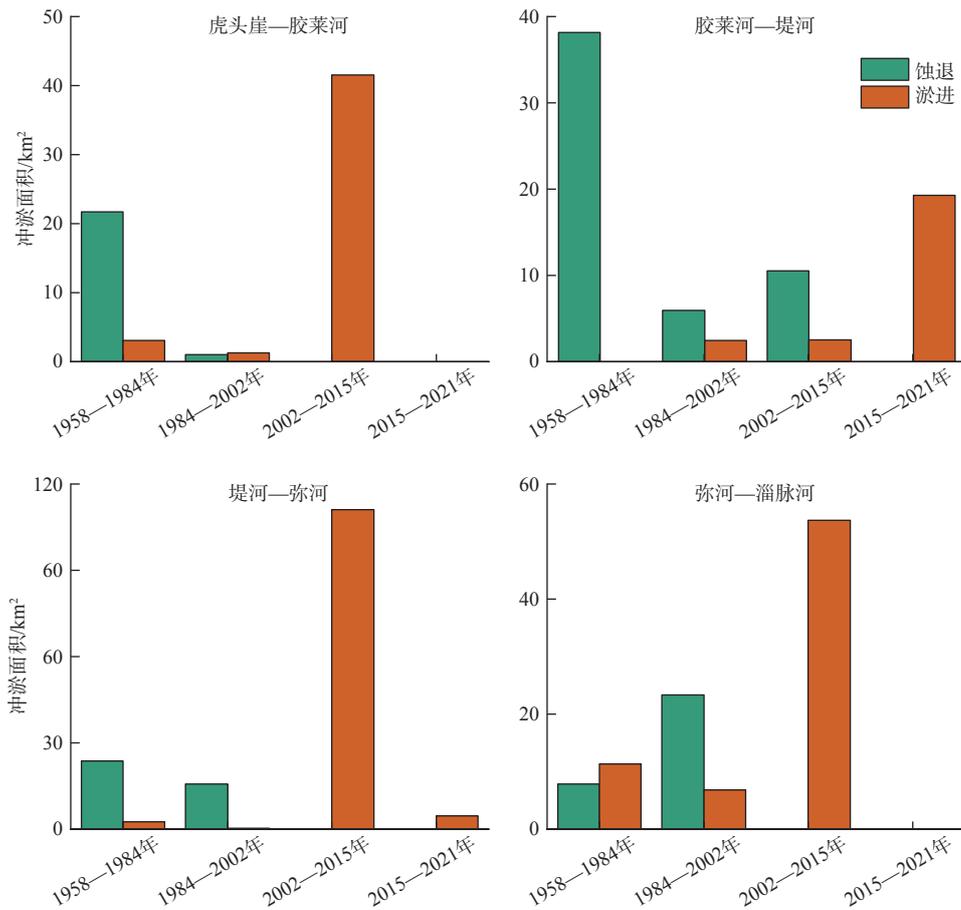


图4 1958—2015年不同岸段海岸线蚀淤面积变化

Fig.4 Changes in coastline erosion and deposition area in different sections from 1958 to 2015

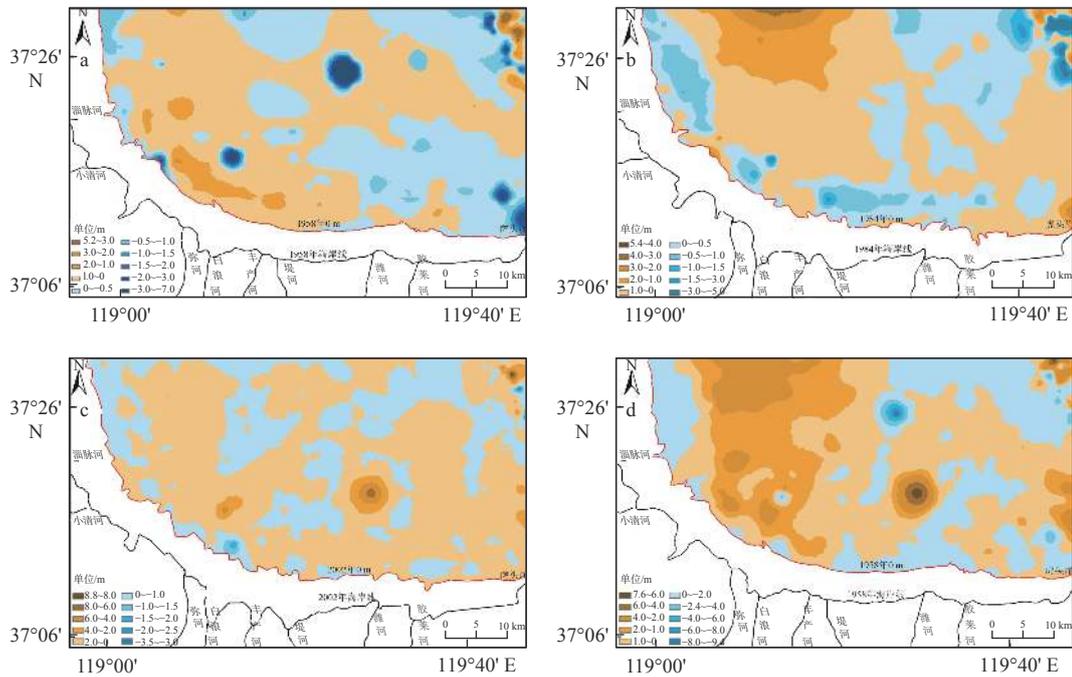
海推进为主,整体向海推进面积为  $3.53 \text{ km}^2$ 。1984—2002年,虎头崖—胶莱河岸段海岸线基本保持稳定,整体向海推进面积仅为  $0.26 \text{ km}^2$ 。弥河—淄脉河和堤河—弥河岸段向陆蚀退面积较多,分别为  $23.27$  和  $15.56 \text{ km}^2$ ;胶莱河—堤河岸段处于微弱的向陆蚀退过程,其整体向陆蚀退面积为  $3.44 \text{ km}^2$ 。2002—2015年,除胶莱河—堤河岸段外,其余岸段均处于向海推进的过程。该阶段海岸线向海推进总面积达  $198.14 \text{ km}^2$ ,年均向海推进  $15.24 \text{ km}^2$ 。其中,胶莱河—堤河岸段海岸线整体向陆蚀退  $7.99 \text{ km}^2$ ;堤河—弥河岸段海岸线向海推进面积最多,为  $111.02 \text{ km}^2$ ,年均向海推进面积为  $8.54 \text{ km}^2$ ;其次为弥河—淄脉河岸段和虎头崖—胶莱河岸段,海岸线向海推进面积分别为  $53.60$  和  $41.51 \text{ km}^2$ 。2015—2021年,虎头崖—胶莱河和弥河—淄脉河岸段海岸线保持不变,胶莱河—堤河和堤河—弥河岸段由于围海养殖和港口的建设分别导致海岸线向海推进  $19.3$ 、 $4.60 \text{ km}^2$ 。

### 3.3 水下岸坡冲淤变化

1958—2015年莱州湾南部水下岸坡海域冲淤

分布极不平衡(图5)。通过对研究区水下岸坡 DEM 演变结果分析表明,水下岸坡冲淤大体上呈斑块状分布,侵蚀和淤积海域分布相对分散,湾内地形演变复杂且稳定性较差。1958—2015年研究区内水下岸坡呈侵蚀—淤积—淤积减缓的趋势。具体而言,1958—2015年,水下区域整体呈侵蚀状态,1984—2002年,水下区域整体呈淤积状态,2002—2015年水下区域呈淤积减缓的趋势。莱州湾南岸河口附近地貌侵蚀显著,河流入海口处在1984年后基本处于侵蚀状态。

1958—1984年,水下岸坡最大淤积厚度出现在东北部莱州浅滩附近,为  $4.20 \text{ m}$ 。该阶段研究区内最大侵蚀深度为  $6.02 \text{ m}$ ,平均冲淤厚度为  $-0.18 \text{ m}$ ,淤积厚度和侵蚀深度范围主要集中在  $0.9 \sim -3.6 \text{ m}$ 。就研究区岸段而言,侵蚀区域集中在淄脉河—弥河河口、潍河口西侧、潍河—虎头崖岸外及东北部地区。弥河—堤河口东侧岸段呈淤积状,其中在弥河口岸外出现条带状的淤积中心,最大淤积厚度达  $2.3 \text{ m}$ 。1984—2002年,水下岸坡整体上淤积作用有所增强,主要表现为最大淤积厚度由  $4.20 \text{ m}$  增加至  $4.83 \text{ m}$ ,



a、b、c、d 分别为 1958—1984、1984—2002、2002—2015、1958—2015 年水下岸坡冲淤变化

图 5 1958—2015 年水下岸坡冲淤变化

Fig.5 Changes in subaqueous slope erosion and siltation from 1958 to 2015

西部淤积特征明显。该阶段平均冲淤厚度为 0.21 m, 侵蚀深度主要介于 0~−1.0 m。水下岸坡东北部由最大淤积转变为最大侵蚀, 且侵蚀区域增多。河口近岸区域基本都处于侵蚀过程中。其中, 在研究区弥河—堤河口离岸海域即永丰河岸外附近出现一个自北向南淤积厚度逐渐减小的半环状淤积中心, 最大淤积厚度达 4.83 m。2002—2015 年, 水下岸坡平均淤积厚度由 0.21 m 减少至 0.14 m, 侵蚀程度较上阶段有所增强, 但侵蚀区域分布更加分散。入海河口区域仍基本处于侵蚀过程中。1958—2015 年, 研究区内平均水深变浅 0.59 m, 其中, 1984—2002 年平均水深变浅幅度最大, 为 0.26 m。1958—2015 年, 水下岸坡整体呈淤积趋势, 平均淤积厚度为 0.45 m。除永丰河—淄脉河口近岸海域为侵蚀状态外, 堤河以西海域淤积特征显著, 且水下岸坡自北向南淤积厚度逐渐减小; 堤河以东海域大体上冲淤相间分布, 水下岸坡冲淤相对平衡。

### 3.4 水下岸坡等深线变化

1958—2015 年, 水下岸坡等深线变化时空差异明显(图 6)。总体而言, 水下岸坡 0 m 和 2 m 等深线变化幅度相对较小, 大体上平行于岸线前进或后退。0 m 等深线在堤河以东呈后退趋势, 堤河—淄脉河岸段呈前进趋势, 其平均后退和平均前进距离

分别为 0.64、0.56 km。2 m 等深线在堤河—小清河岸段前进较明显, 平均前进 0.82 km; 而在其余岸段基本处于平衡状态。水下岸坡 5~9 m 等深线之间海域冲淤演变复杂, 其在堤河以西岸段呈显著的前进趋势。10 m 等深线在堤河以东表现为后退状态, 在堤河以西表现为前进状态。

1958—1984 年, 0、2、5 和 10 m 等深线总体上表现为前进和后退相间分布的特征(图 6a)。0 m 等深线在堤河—虎头崖岸段向陆后退最明显, 平均向陆后退 0.65 km, 与该阶段内海岸线变化相一致; 小清河河口东侧局部 0 m 等深线向陆后退明显, 最大距离达 1.43 km; 堤河以西除白浪河—小清河岸段有所前进外, 其余岸段基本无明显变化。2 m 等深线除在虎头崖西侧局部表现为后退状态外, 在其余岸段整体表现为向海前进趋势, 平均前进距离为 0.36 km, 最大前进距离为 1.74 km。5 m 等深线大体上以堤河为界, 堤河以东表现为后退状态, 堤河以西岸段表现为前进状态。10 m 等深线有前进有后退, 表现为相间分布的状态。1984—2002 年, 0~5 m 等深线整体变化幅度相对较小, 大体上平行于岸线前进或后退(图 6b)。以潍河为界, 0、2、5 m 等深线在潍河以西岸段均表现出向陆后退趋势, 其平均后退距离分别为 0.62、0.53、0.34 km。而 6~9 m 等深线在堤河以西尤其是永丰河—小清河岸段表现出

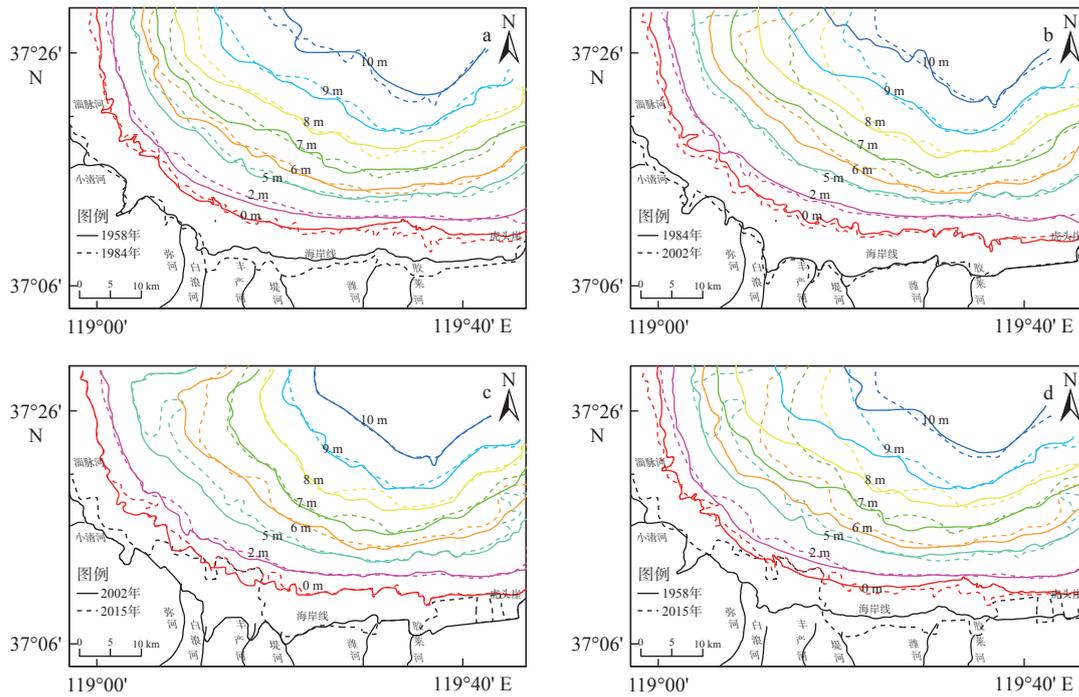


图 6a、b、c、d 分别为 1958—1984、1984—2002、2002—2015、1958—2015 年等深线变化

图 6 1958—2015 年等深线变化

Fig.6 Isobath changes from 1958 to 2015

强烈的向海前进趋势。相比较 6~9 m 等深线, 10 m 等深线向海前进幅度较小, 最大前进距离达 7.05 km。2002—2015 年, 0 m 等深线除在堤河—淄脉河岸段呈显著的前进状态外, 在其余岸段基本处于平衡状态(图 6c), 堤河—淄脉河岸段 0 m 等深线平均前进距离为 0.78 km, 最大距离达 2.56 km。2 m 等深线除在堤河—小清河岸段有所前进外, 在其余岸段基本保持平衡状态。10 m 等深线基本没有发生变化。与 1984—2002 年相比, 2002—2015 年, 5~9 m 等深线向海前进变化幅度减小; 5 m 等深线在淄脉河岸外呈显著的向北、东弯曲前进状态。

## 4 讨论

### 4.1 河流输沙变化对海岸地貌的影响

河流来沙是莱州湾南部最主要的物质来源之一, 包括黄河来沙和南岸河流来沙。来自黄河三角洲的泥沙对莱州湾产生了显著的地貌影响。1976 年黄河改道清水沟后, 入海泥沙等沉积物在黄河口南北往复流的作用下向南输运, 为莱州湾输入大量沉积物; 1996 年黄河再次改道清 8 汉, 导致原清水沟流路水沙来源减少, 河流造陆作用减弱, 河口三角洲遭受强烈侵蚀, 大量侵蚀物源被向外向南搬运、

沉积。就南岸河流来沙而言, 由于 1970 年后河流上游水库和 1980 年后下游入海河闸等海岸工程的建设, 导致河流入海泥沙显著减少。入海泥沙的减少造成莱州湾南部沉积物输入与输出失衡, 导致海岸带尤其是河口地区遭受侵蚀, 因此, 莱州湾南部河流入海口在 1984 年后基本呈侵蚀状态(图 5)。据主要河流的输沙量资料表明, 小清河和淄脉河、弥河、潍河和胶莱河修建水库和河闸后入海沙量分别减少了  $39.9 \times 10^4$ 、 $19.7 \times 10^4$ 、 $395.22 \times 10^4$  和  $22.8 \times 10^4$  t<sup>[29]</sup>。1958—1984 年, 随着河流上游水库的建设, 河流入海泥沙量大大减少, 进而导致该阶段内水下岸坡整体上侵蚀作用较强。堤河以西由于受黄河来沙的影响, 侵蚀相对较弱, 而潍河—虎头崖岸段近岸海域侵蚀较明显。1980 年以来黄河中上游水土保持初见成效, 加之 1999 年小浪底水库实施调水调沙以后, 利津站的输沙量急剧减少。根据利津站的水沙统计资料表明, 21 世纪初期黄河径流量和输沙量减少至  $13.3 \times 10^9$  m<sup>3</sup> 和  $0.56 \times 10^8$  t<sup>[30]</sup>。黄河入海泥沙和南部河流来沙的减少共同导致 2002—2015 年水下岸坡淤积作用逐渐减弱。

另外, 研究区东北部为莱州浅滩附近, 其泥沙直接来源为刁龙嘴海岸输沙, 最终来源为刁龙嘴以东、龙口以西的河流输沙<sup>[31]</sup>。对 1958—2015 年莱州浅滩附近的冲淤分析发现, 该区域在 1958 年后

特别是 1958—2002 年间,淤积中心和淤积厚度逐渐减小,总体上处于侵蚀、解体状态,地貌冲淤演变复杂(图 5)。20 世纪 50 年代以来,尤其是 1958 年以后、1984 年之前,刁龙嘴以东岸段的河流中上游陆续修建了近百座中、小型水库及拦水塘坝,使得河流入海泥沙量减少。自 20 世纪 80 年代中期开始,当地有关企业又开始在浅滩采沙用做建筑材料。受以上人为因素的影响,浅滩因泥沙亏损而逐渐侵蚀。2002 年后,当地对莱州浅滩地区进行人工补沙,物源的增多导致 2002—2015 年水下地貌侵蚀有所缓和。但从长远来看,莱州浅滩将会继续受到侵蚀,其进一步发展将使浅滩解体破碎。

#### 4.2 海洋动力作用对海岸地貌的影响

莱州湾海岸地貌演变与海岸的泥沙来源和海洋动力作用下的泥沙输运、泥沙沉积等因素密切相关<sup>[32]</sup>。莱州湾南部河流入海沉积物受波浪、潮汐、沿岸流和风暴潮等海洋作用的影响,陆海相互作用复杂。波浪和潮流是海湾发育的重要条件<sup>[33-34]</sup>。波浪和潮流作用下的泥沙输运对莱州湾沉积环境和地貌演化具有重要的影响,而风暴潮则对海岸地貌的演变起到促进作用<sup>[35-36]</sup>。

莱州湾湾顶落潮流向 NE 向,涨潮流向 SW 向,属于弱潮流区,其潮流的主轴方向基本垂直于海湾顶部,有利于泥沙向湾顶堆积。加之,莱州湾南部地区地貌特征为内凹型,东、西两侧岸线基本为 SN 向,南侧海岸线大体为 EW 向,进一步对南部地区的沉积特征产生重要影响。在常浪向和强浪向均为偏 NE 向的海洋动力条件下,莱州湾东岸的泥沙在波浪的作用下往西南输运。来自黄河三角洲的入海泥沙在潮流作用下自北向南输运,其在莱州湾南部的扩散范围大体上在堤河以北、以西海域;而弥河—白浪河口附近由于岸线走向大体为 NW—SE 向,其岸段走向正对波浪等海洋动力方向,因此在河流输沙不足的情况下极易发生侵蚀(图 5)。黄河口附近为莱州湾的强流区,从黄河口向东、向湾内流速逐渐减小。渤海沿岸流中的鲁北沿岸流常年自黄河口经莱州湾南部向东流动,西侧的沉积和被侵蚀物质被向东搬运,且在搬运过程中泥沙等沉积物沿途沉积,导致 1958—2015 年小清河以北岸段近岸侵蚀作用较强,南部东岸尤其是潍河—虎头崖岸段侵蚀作用逐渐减弱(图 5)。此外,在清水沟河口外 4~9 m 等深线之间存在一个弧形沉积带,且弧形沉积带中部位于河口位置并与重力沉积位置

重叠,而弧形沉积带两侧被认为是河口三角洲外最快速的沉积中心,因而导致入海沉积物向两侧输运、沉积<sup>[37]</sup>。研究区的西侧和南侧在水下冲淤和等深线演化上具有显著差异,其西侧等深线的迁移幅度远大于南侧,两区域的地貌演变不同步(图 6)。因此,1958—2015 年尤其是 1984—2002 年间,水下岸坡西侧即黄河入海口南侧呈显著的自北向南淤积状态(图 5),且 5~9 m 等深线向海推进显著(图 6)。

莱州湾是中国风暴潮频发区域之一。风暴潮的发生会导致海洋动力作用增强。1950—2013 年,莱州湾沿岸灾害性风暴潮共出现 21 次,平均每 3 年 1 次<sup>[4]</sup>。其中,1980—1989 年平均每 2.5 年发生一次;1990—1999 年平均每 5 年发生一次。1984—2002 年,风暴潮的频发导致黄河口风浪作用增强,沿岸纵向向南搬运的泥沙增多,加剧了水下岸坡西侧的淤积,从而导致研究区内水下区域整体上呈淤积趋势。另外,据《中国海平面公报》记载,20 世纪以来,黄、渤海海平面整体呈现上升趋势,平均每年上升约 3.1 mm,且北黄海的上升幅度大于南黄海的。海平面上升使得海洋侵蚀作用增强。从 1958—2015 年水下岸坡的冲淤演变可以发现,水下岸坡区域永丰河—虎头崖岸段,尤其是小清河以北近岸海域,一直处于不同程度的侵蚀过程,且 2002—2015 年水下岸坡淤积呈减缓趋势。

#### 4.3 人工设施建设对海岸地貌的影响

随着海岸带的开发建设,人类活动在海岸地貌演变中的作用愈发明显。1958 年以来,特别是 1980 年后,人类活动的影响逐渐加剧且占据主导地位。莱州湾南岸地区的人类活动主要有养殖池、盐田及海岸工程建设,其中海岸工程又包括港口、围填海和防潮堤建设。在人类活动的干预下自然岸线长度逐渐减少,人工岸线长度逐渐增加且向海推进。1958—1984 年,莱州湾南部仅在弥河—小清河岸段潮上带修建了部分养殖池,该阶段内弥河—小清河岸段海岸线变化幅度较小,海岸基本处于自然演变过程中;由于弥河、潍河和胶莱河上游水库的修建,造成河流下游泥沙急剧减少,导致弥河以东岸段海岸线在该阶段内处于蚀退状态(图 2)。1984—2015 年,海岸线迅速向海推进。其中,2002—2015 年,由于虎头崖—胶莱河岸段养殖池的向海扩建以及堤河—弥河和弥河口西侧港口、围填海等工程的建设,导致海岸线向海推进最明显。堤河以东岸段除局部养殖池向海扩建外,其余海岸线基本保持不变。

到 2015 年莱州湾南部的自然岸线基本被人工设施所覆盖。2015—2021 年,由于围垦受限,除胶莱河—潍河岸段和弥河口东侧岸段受围海养殖和港口建设的影响海岸线局部向海推进外,其余岸线保持不变。随着海岸地貌的演变,海岸线逐渐达到稳定状态。由于 2002—2015 年弥河入海口和白浪河入海口防潮堤的建设,弥河—丰产河近岸区域水动力作用增强,水下岸坡发生侵蚀。白浪河、弥河和堤河河口侵蚀后退,其中,离防波堤最近的白浪河侵蚀最为严重(图 5)。

在养殖业发展的同时,丰富的地下卤水资源促进了盐业的发展。莱州湾南岸自 1992 年开始扩建莱州盐场,1994 年完成扩建潍坊寒亭盐场,昌邑盐

场、羊口盐场、大家洼盐场后续也相继建设并扩建。到 2021 年,研究区养殖池和盐田面积达  $916.19 \text{ km}^2$  (图 7)。2009 年国务院和山东省分别出台《黄河三角洲高效经济区发展规划》和《实施集中集约用海打造山东半岛蓝色经济区草案》,莱州湾的开发力度进一步加强,2002—2015 年海岸线向海推进幅度为近几十年来最大。莱州湾南岸养殖池和盐田的建设切断了原来潮上带—潮间带的动力、泥沙交换。水动力环境的变化造成海岸的消能作用以及潮间带—潮下带的泥沙补充功能减弱,导致波能强烈冲刷海岸,水下岸坡上部的水动力作用增强<sup>[4]</sup>,从而造成 1958—2015 年水下岸坡近岸区域的侵蚀作用相对较强。

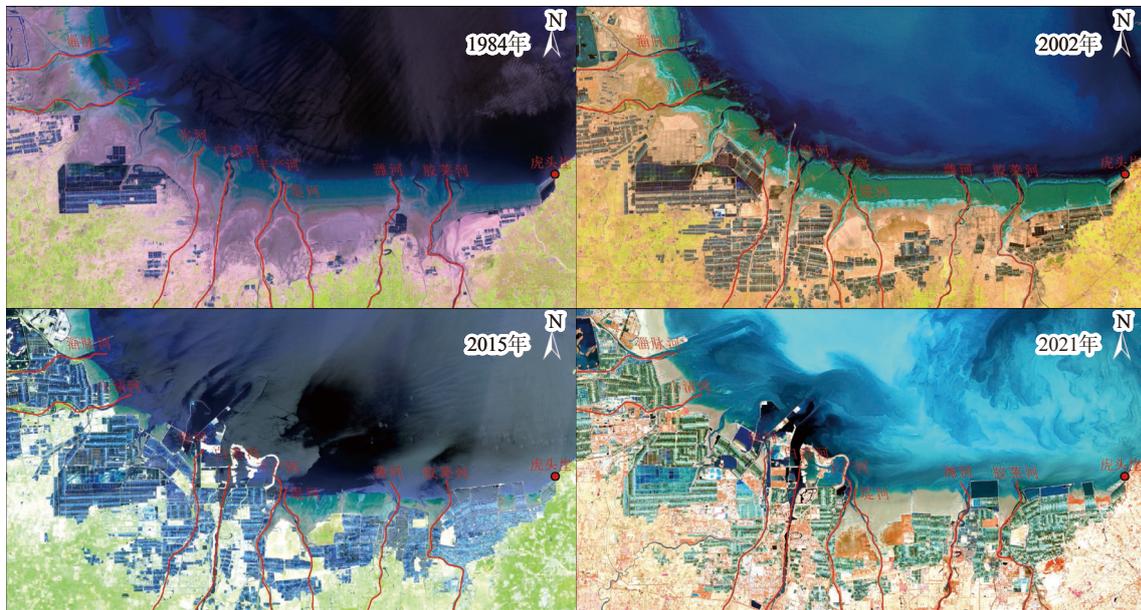


图 7 莱州湾南部影像

Fig.7 Images of the southern part of Laizhou Bay

## 5 结论

本文从时空角度定量分析了 1958 年以来莱州湾南部海岸线和水下地形的演变趋势和规律,得出以下结论:

(1) 1958—2021 年,海岸线长度变化表现为自然岸线的减少和人工岸线的增加。1984 年后海岸线变化加速,且 2015 年后基本被人为固定;到 2021 年人工岸线长度约占总长度的 87%。1958—1984 年以自然演变为主下海岸线向陆蚀退,1984—2021 年在人为干预下海岸线向海推进。养殖池、盐田以及其他海岸工程的建设使原本的自然岸线几乎全部被人为设施所覆盖,大量滩涂及浅海水被

人工围填。

(2) 1958—2015 年,水下岸坡冲淤分布极不平衡,总体呈侵蚀—淤积—淤积减缓的趋势。0、2 m 等深线变化幅度相对较小,基本平行于岸线变化;而 5~9 m 等深线之间冲淤演变复杂,其等深线在堤河以西海域向海前进显著;10 m 等深线在堤河以东表现为后退状态,堤河以西表现为前进状态。由于河流上游水库建设和入海河闸等工程建设,造成近岸河流入海口附近在 1984 年后基本呈侵蚀状态。

(3) 河流来沙是导致海岸线和水下岸坡演变的重要物质基础,波浪和潮流是主要的驱动力,风暴潮和海平面上升起到促进作用。1984 年以来黄河泥沙和南部河流来沙的减少导致 2002—2015 年水

下岸坡淤积作用逐渐减弱。1958—2015年,研究区西侧北部的弧形沉积带和沿岸流将物源自北向南、东搬运,导致小清河以北近岸侵蚀作用较强,而南部东岸侵蚀逐渐减缓。2002—2015年,入海河口防潮堤的建设导致近岸水动力作用增强且发生侵蚀,其中,离防波堤最近的白浪河侵蚀最为严重。此外,东北部莱州浅滩附近受人为影响处于侵蚀、解体状态,未来会继续受到侵蚀,从而导致浅滩解体破碎。

#### 参考文献:

- [1] 夏东兴,王文海,武桂秋,等. 中国海岸侵蚀述要[J]. *地理学报*, 1993, 48(5): 468-476.
- [2] THAMPANYA U, VERMAAT J E, SINSAKUL S, et al. Coastal erosion and mangrove progradation of southern Thailand[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2006, 68(1/2): 75-85.
- [3] DADA O A, QIAO L, DING D, et al. Evolutionary trends of the Niger Delta shoreline during the last 100 years: responses to rainfall and river discharge[J]. *Marine Geology*, 2015, 367: 202-211.
- [4] 战超,于君宝,王庆,等. 近60年莱州湾东部砂质海岸地貌的时空动态[J]. *海洋学报*, 2017, 39(9): 90-100.
- [5] AIELLO A, CANORA F, PASQUARIELLO G, et al. Shoreline variations and coastal dynamics: a space-time data analysis of the Jonian littoral, Italy[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2013, 129(1): 124-135.
- [6] CONWAY B. Rapid sea-level change and coastal evolution on the Pacific margin of Canada[J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 150: 171-183.
- [7] 尹砚军,吴建政,朱龙海,等. 莱州湾东岸三山岛—石虎嘴近岸海域冲淤演变[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(9): 41-46.
- [8] 刘世昊,丰爱平,杜军,等. 莱州湾东岸三山岛段砂质海岸沉积物运移动力机制[J]. *海洋科学进展*, 2014, 32(3): 343-354.
- [9] 仲少云,王庆,战超,等. 最近50年来莱州湾东部典型砂岸潮上带土地利用变化研究[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(2): 410-419.
- [10] 李雪艳,王庆,王红艳,等. 莱州湾东部潮上带土地利用对海岸侵蚀退的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(6): 1347-1357.
- [11] 孙伟富. 1978—2009年莱州湾海岸线变迁研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2012.
- [12] 彭远新,邓振利,姜亚俊,等. 近50年莱州湾南岸海岸线变迁遥感监测研究[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(3): 54-56.
- [13] 丁小松,单秀娟,陈云龙,等. 基于数字化海岸分析系统(DSAS)的海岸线变迁速率研究: 以黄河三角洲和莱州湾海岸线为例[J]. *海洋通报*, 2018, 37(5): 565-575.
- [14] 崔钰磊,王庆,金秉福,等. 最近40年来莱州湾南岸地貌演变研究[J]. *鲁东大学学报*, 2015, 31(2): 7-13.
- [15] 中国海湾志编委会. 中国海湾志(第三分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 1-81.
- [16] 庄振业,许卫东,李学伦. 渤海南岸6000年来的岸线演变[J]. *青岛海洋大学学报*, 1991, 2: 99-110.
- [17] 王文海,吴桑云,陈雪英. 山东省9216号强热带气旋风暴期间的海岸侵蚀灾害[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(4): 71-78.
- [18] 朱学明,鲍献文,宋德海,等. 渤、黄、东海潮汐、潮流的数值模拟与研究[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(6): 1103-1113.
- [19] 张永强,迟万清,胡泽建,等. 黄河清水沟流路大嘴的形成对莱州湾潮流场影响的数值研究[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(2): 149-157.
- [20] 李晓炜,侯西勇,邸向红,等. 从生态系统服务角度探究土地利用变化引起的生态失衡: 以莱州湾海岸带为例[J]. *地理科学*, 2016, 36(8): 1197-1204.
- [21] 王庆. 全新世以来山东半岛东北部海面变化的河流地貌响应[J]. *地理科学*, 1999, 19(3): 34-40.
- [22] 王李娟,牛铮,赵德刚,等. 基于ETM遥感影像的海岸线提取与验证研究[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(2): 235-239.
- [23] 卢薇艳,罗鹏,龚淑云. 基于遥感技术的海岸线提取及应用研究综述[J]. *华南地质与矿产*, 2019, 35(3): 393-397.
- [24] 吕立雷,董玉磊,奉定平,等. 海岸线自动提取方法研究[J]. *海洋测绘*, 2019, 39(4): 57-60.
- [25] 梁立,刘庆生,刘高焕,等. 基于遥感影像的海岸线提取方法综述[J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(12): 1745-1755.
- [26] 夏东兴,段焱,吴桑云. 现代海岸线划定方法研究[J]. *海洋学研究*, 2009, 27(1): 28-33.
- [27] 林起忠. WGS-84坐标系到地方坐标系的转换方法及精度分析[J]. *城市勘测*, 2016, 2: 108-112.
- [28] 谢建春,陈同峰,姚磊,等. 1980西安坐标系与2000坐标系坐标成果转换方法及精度分析[J]. *山东国土资源*, 2012, 28(8): 58-60.
- [29] 杨鸣. 莱州湾南岸海岸带环境退化及治理对策研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [30] 陈翠霞,安催花,罗秋实,等. 黄河水沙调控现状与效果[J]. *泥沙研究*, 2019, 44(2): 69-74.
- [31] 王庆,杨华,仲少云,等. 山东莱州浅滩的沉积动态与地貌演变[J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 749-756.
- [32] CHEN J Y, CHEN S L. Estuarine and coastal challenges in China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2002, 2: 174-181.
- [33] 夏菲,张永战,吴蔚. EOF分析在海岸地貌与沉积学研究中的应用进展[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(2): 174-186.
- [34] 韩美,孟庆海. 莱州湾沿岸的地貌类型[J]. *山东师范大学学报(自然科学版)*, 1996, 3: 64-68.
- [35] 秦亚超,李日辉. 表层沉积物粒度所指示的渤海现代沉积体系[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(3): 654-666.
- [36] 崔金瑞,夏东兴. 山东半岛海岸地貌与波浪、潮汐特征的关系[J]. *海洋科学进展*, 1992, 10(3): 20-25.
- [37] ZHAN C, WANG Q, CUI B, et al. The morphodynamic difference in the western and southern coasts of Laizhou Bay: responses to the Yellow River Estuary evolution in the recent 60 years[J]. *Global and Planetary Change*, 2020, 187(3): 103138.

## On the change of coastline and underwater terrain of the southern Laizhou Bay since 1958

REN Zonghai<sup>1,2</sup>, YU Jiankui<sup>1,3</sup>, WANG Qing<sup>1</sup>, ZHAN Chao<sup>1\*</sup>,  
GENG Wenqian<sup>1</sup>, CAO Yin<sup>1</sup>, LI Rui<sup>1</sup>, QIAN Zhangfan<sup>1</sup>

(1 Institute of Coastal Research, Ludong University, Yantai 264025, China; 2 College of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3 Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

**Abstract:** The coastal geomorphology of the southern coast of Laizhou Bay, Shandong, has changed greatly since the 1980s. It is of great significance to study the evolution of coastal geomorphology for coastal protection and sustainable utilization of coastal resources. We used the charts and remote sensing images measured or imaged in different periods as data sources, and quantitatively studied the coastline and offshore slope evolution based on remote sensing and GIS technology. The results show that: ① from 1958 to 2021, the natural shoreline gradually decreased and the artificial shoreline gradually increased. Until 2021, the length of artificial shoreline accounted for about 87% of the total length. Coastline evolution was closely related to the coastal construction; ② taking 1984 as the boundary, natural evolution dominated before 1984, and human activities played a leading role after 1984. Under natural evolution, the coastline was dominated by land erosion. Under human intervention, it was dominated by seaward advance; ③ the distribution of erosion and deposition on the subaqueous slope was extremely unbalanced, and the overall trend was from erosion, siltation, to slowed-down siltation. The southern river estuary was largely eroded after 1984. The 0 m and 2 m isobaths advanced or retreated slightly. The 5~9 m isobaths advanced seaward significantly in the west of the Dihe River, and the evolution of erosion-siltation was complicated. The 10 m isobath was bounded by the Dihe River, showing the state of westward siltation and eastward erosion. River sediment is the important material basis for the evolution of coastline and subaqueous slope. Waves and tidal currents are the main driving forces. While causing a decrease in river sediment transport, artificial facilities have also led to a significant advance of the coastline and erosion of estuaries. The northeast Laizhou shoal is in a state of erosion and disintegration due to human influence, and will continue to be eroded in the future.

**Key words:** Laizhou Bay; coastline; subaqueous slope; isobath